

Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт ионосферы, Харьков

Л.Ф. ЧЕРНОГОР, д-р физ.-мат. наук, проф., ХНУ имени В.Н. Каразина

ВАРИАЦИИ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ВО ВРЕМЯ ЧАСТНОГО СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 4 ЯНВАРЯ 2011 г.

Розглянуто особливості вимірювання та наведено результати спостережень варіацій вертикальної складової швидкості руху іоносферної плазми за допомогою радару некогерентного розсіяння під час часткового (близько 0.78) сонячного затемнення 4 січня 2011 р. поблизу м. Харкова. Проведено порівняння результатів спостережень у день затемнення з результатами, отриманими в контрольні дні. Показано, що затемнення викликало процеси перебудови іоносфери, подібні наступу короточасної ночі.

Рассмотрены особенности измерения и приведены результаты наблюдений вариаций вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы с помощью радара некогерентного рассеяния во время частного (около 0.78) солнечного затмения 4 января 2011 г. вблизи г. Харькова. Проведено сравнение результатов наблюдений в день затмения с результатами, полученными в контрольные дни. Показано, что затмение вызвало процессы перестройки ионосферы, подобные наступлению кратковременной ночи.

The features of measurement of vertical component of the ionospheric plasma drift velocity by means of incoherent scatter radar and the results of observations of velocity variations during the partial (about 0.78) solar eclipse on January 4, 2011 near Kharkiv are presented. A comparison of results of observations in the day of eclipse with results obtained in other days is carried out. It is shown that the eclipse caused restructuring of the ionosphere similar to short-term coming of night.

Постановка задачі. Солнечное затмение (СЗ) относится к высокоэнергетическим источникам. Оно приводит к существенному изменению параметров околоземной среды и взаимодействий между подсистемами системы Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера. Одним из основных процессов, характеризующих состояние и динамику ионосферы является движение ионосферной плазмы. Изучение вариаций скорости движения ионосферной плазмы во время относительно редкого природного явления – СЗ – является важной и актуальной задачей, позволяющей усовершенствовать региональные модели ионосферы.

Анализ литературы. Изучению воздействия СЗ на среду посвящено значительное количество работ (см., например, [1, 2]). Наиболее полную информацию в широком диапазоне высот получают при помощи метода некогерентного рассеяния (НР) [3]. Метод позволяет получить сведения о параметрах плазмы и её движении. В работах [4 – 7] представлены наблюдения параметров ионосферы в период СЗ в условиях средней и относительно высокой солнечной активности.

Цель статьи – изложение особенностей измерения вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы и результатов наблюдения за переносом плазмы в области F ионосферы в период частного СЗ вблизи г. Харькова 4 января 2011 г. и в контрольные дни в условиях относительно низкой солнечной активности.

Общие сведения о солнечном затмении. В месте проведения измерений (вблизи г. Харькова) СЗ началось в 07:29:39, а закончилось в 10:28:36, главная фаза имела место в 8:58:30 (здесь и далее время UT). Максимальная затенённая площадь диска составляла около 70.8 %.

Состояние космической погоды. День СЗ 4 января 2011 г., как и фоновые дни, были спокойными. В частности, 4 января индекс магнитной активности $A_p = 4$, а в фоновые дни 22 декабря и 5 января $A_p = 0$ и 2 соответственно. Это обстоятельство облегчало выделение возмущений, связанных с затмением. Индекс солнечной активности $F_{10.7}$ 22 декабря, 4 и 5 января составлял 78, 91 и 88 соответственно.

Средства и методы. Измерения осуществлялись с помощью радара НР Института ионосферы (49°36' с.ш., 36°18' в.д.). Его основные параметры: импульсная мощность радиопередающего устройства – 2 МВт, эффективная площадь антенны – около 3700 м², частота следования зондирующих импульсов – 24.4 Гц. Шумовая температура радиоприемного устройства (РПРУ) равна 120 К. Эффективная шумовая температура системы составляет 470 – 980 К. Зондирование ионосферы осуществлялось составным радиоимпульсным двухчастотным сигналом, один из элементов которого имел длительность 650 мкс и несущую частоту $f_0 = 158$ МГц, а второй – длительность 130 мкс и частоту $f_1 = f_0 + 0.1$ МГц. В РПРУ осуществлялась частотная селекция некогерентно рассеянных эхо-сигналов и выделение квадратурных сигналов для каждого из элементов с помощью синхронного детектирования. В результате приёма и обработки рассеянного ионосферой сигнала от первого элемента определялись электронная концентрация N_e , температуры ионов T_i и электронов T_e , вертикальная скорость движения плазмы V_z и ионный состав для ряда высот вблизи и выше максимума ионизации с разрешением по высоте около 120 км. Отклик от второго элемента использовался для определения высотного профиля мощности НР сигнала в диапазоне высот 100 – 550 км с разрешением по высоте 20 км.

Методика определения скорости ионосферной плазмы. Вертикальная составляющая скорости движения ионосферной плазмы V_z определялась одновременно для ряда высот ионосферы по квадратурным составляющим комплексной корреляционной функции (КФ) НР сигнала:

$$V_z(h_j) = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\sum_{k=1}^n \left\{ \arctg \left[\frac{r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)}{r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)} \right] \right\} r^2(t_j, \tau_k) \tau_k}{\sum_{k=1}^n r^2(t_j, \tau_k) \tau_k^2},$$

где λ – длина волны радара, n – количество используемых значений КФ, $r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)$ и $r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)$ – квадратурные составляющие нормированной КФ для задержки распространения сигнала t_j , соответствующей высоте h_j , $h_j = ct_j/2$, $\tau_k = k\Delta\tau$, k – номер значения КФ, $k = 1 \dots 9$, $\Delta\tau = 61$ мкс – шаг сдвига КФ, $r^2(t_j, \tau_k) = r_{\text{Re}}^2(t_j, \tau_k) + r_{\text{Im}}^2(t_j, \tau_k)$.

Обработка данных включает в себя определение значений мощности и КФ НР сигнала для каждого дискретного времени запаздывания t_j при фиксированных задержках τ_k в виде разности оценок статистических параметров смеси сигнал+шум и шума, усредненных по ряду замеров в конце развертки дальности, где уровень НР сигнала пренебрежимо мал, коррекцию результатов обработки и нормирование КФ.

В результате первичной обработки в реальном времени для каждой высоты $h_j = ct_j/2$ определяются базовые оценки статистических характеристик НР сигнала при временном накоплении, равном 1 мин.

Вторичная обработка включает в себя отбраковку данных, подверженных искажениям, усреднение статистических характеристик НР сигнала по высоте (с учетом трапецеидального усреднения КФ НР сигнала [8]) и по времени и, наконец, вычисление скорости V_z . Отбраковка данных осуществляется при наличии помех. Чаще всего, помехи вызваны отражением зондирующего сигнала от космических аппаратов, космического мусора, метеороидов и т.п. Отбраковка такой помехи не представляет особой сложности, поскольку она легко проявляется на фоне шума из-за большой её интенсивности при отражении от точечной цели (в отличие от слабого сигнала НР), её длительность, равная длительности зондирующего радиосигнала, и КФ (спектр) известны, а продолжительность не превышает нескольких секунд. Сложнее обстоит дело с помехами радиолокационных станций, но в настоящее время они проявляются относительно редко. Интервал усреднения по времени для определения V_z устанавливается в зависимости от условий измерений и обычно равен 15 мин.

Среднеквадратическая погрешность определения скорости изменялась от 3 м/с (на высотах в районе максимума ионизации) до 20 м/с (при 15-минутном накоплении и отношении сигнал/шум q выше 0.2).

Особенностью измерений являлись пониженные значения q , что вызвано низкой солнечной активностью, а также малая (характерная для зимнего сезона) толщина области F ионосферы. В связи с этим возникла необходимость особо тщательной отбраковки данных измерений КФ, подверженных воздействию помех.

Результаты наблюдений. Во время СЗ наблюдалось увеличение абсолютных значений скорости нисходящего ($V_z < 0$) движения ионосферной плазмы с последующим их восстановлением (рис. 1, 2). Изменение скорости симметрично относительно главной фазы затмения (см. рис. 1). Наибольшее

отклонение скорости наблюдалось при максимальном покрытии Солнца и составляло 9, 18, 34, 54 м/с на высотах 250, 300, 350, 400 км соответственно, а высотный профиль V_z был подобен ночному профилю (на всех высотах $V_z < 0$) (см. рис. 2).

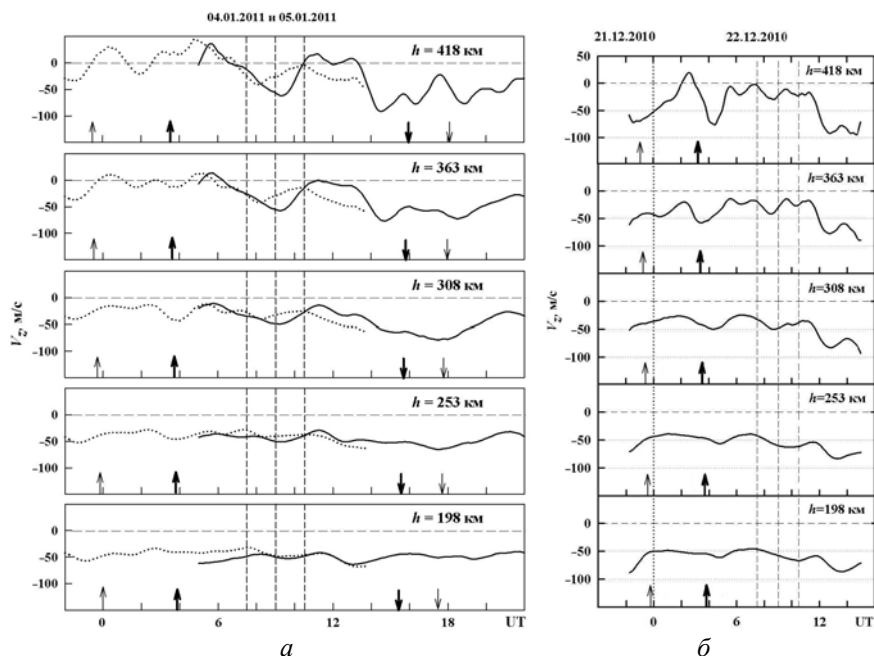


Рис. 1. Временные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z в день затмения 4 января (на рис. *a* – линии) и в контрольные дни 5 января (точки) 2011 г. и 22 декабря 2010 г. (*б*) для фиксированных высот при интервале накопления 105 мин. Стрелками обозначены моменты восхода и захода Солнца на соответствующих высотах в Харькове (жирные) и магнитосопреженной точке (тонкие). Вертикальные пунктирные линии обозначают моменты, соответствующие началу, главной фазе и окончанию СЗ

В контрольные дни 22 декабря 2010 г. и 5 января 2011 г. в интервале времени с 7:00 до 10:00 отмечалось изменение V_z , но его характер, положение на временной оси и амплитуда значительно отличались от вариаций V_z 4 января (см. рис. 1).

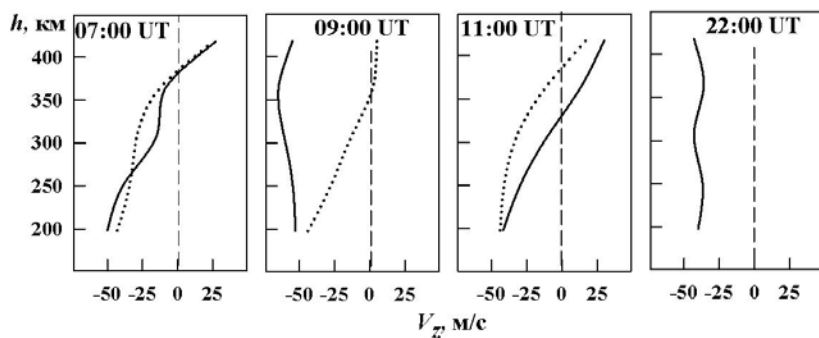


Рис. 2. Высотные профили вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z в характерные моменты времени: до начала, в максимальной фазе, после окончания солнечного затмения и ночью 4 января 2011 г. (непрерывные линии) и в те же моменты в контрольный день 5 января 2011 г. (точки). Интервал накопления 15 мин. Время на графиках – UT

Выводы. Во время главной фазы солнечного затмения характер переноса ионосферной плазмы подобен ночному. Солнечное затмение приводит к перемене направления движения плазмы с восходящего на нисходящее и к увеличению абсолютного значения скорости нисходящего движения ионосферной плазмы. Максимальное изменение скорости достигается в момент, близкий к главной фазе затмения Солнца, и увеличивается с высотой (с 15 – 20 до 60 – 80 м/с). В этом заключаются основные особенности вариаций скорости.

Список литературы: 1. Jones T.B. The detection of atmospheric waves produced by the total solar eclipse 11 August 1999 / T.B. Jones, D.M. Wright, J. Milner et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2004. – V. 66, № 5. – P. 363 – 374. 2. Черногор Л.Ф. Эффекты солнечных затмений в приземной атмосфере / Черногор Л.Ф. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 44, № 4. – С. 467 – 482. 3. Evans J.V. Ionospheric movements measured by incoherent scatter: A review / J.V. Evans // J. Atmos. Terr. Phys. – 1972. – V. 34. – P. 175 – 209. 4. Бурмака В.П. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. / В.П. Бурмака, Е.И. Григоренко, Л.Я. Емельянов и др. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 3. – С. 38 – 53. 5. Дзюбанов Д.А. Динамика плазмы ионосферы над Харьковом в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. / Д.А. Дзюбанов, Л.Я. Емельянов, Л.Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 62 – 69. 6. Емельянов Л.Я. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений / Л.Я. Емельянов, М.В. Ляшенко, Л.Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 70 – 81. 7. Taran V.I. Investigation of circumterrestrial space by means of incoherent scatter radar / V.I. Taran, V.K. Bogovsky, V.N. Lysenko et al. // Космічна наука і технологія, Space Plasma physics (додаток до журналу). – 2001. – Т. 7, № 2. – С. 36 – 41. 8. Holt J.M. Optimal analysis of incoherent scatter radar data / J.M. Holt, D.A. Rhoda, D. Tetenbaum, A.P. van Eyken // Radio Sci. – 1992. – V. 27, № 3. – P. 435 – 447.

Поступила в редколлегию 30.06.2011